

《水利水电施工》
丛 书

土石料压实和质量控制

杨 荫 华



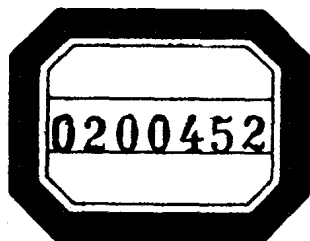
《水利水电施工》丛书



006013 水利部信息所

土石料压实和质量控制

杨荫华



水利电力出版社

20039/46
32

(京)新登字115号

内 容 提 要

土石料压实和质量控制是决定土石方填筑工程质量的关键技术问题。

本书共分三章。第一章土、岩石的物理性质和分类,简要叙述了与土、石分类及判别压实程度有关的物理性质指标和土、石的通用分类法。第二章土石料压实,比较全面系统的论述了粘性土的压实原理,无粘性土和石料压实的特征,影响压实的主要因素;压实对土石方工程性质的影响,各种压实机械的性能,室内压实试验,现场碾压试验及土石方填筑的压实等。第三章压实质量控制,阐述了判别压实的质量指标、质量控制试验和控制方法及统计的质量控制等问题。

本书可供水利、能源、铁道、交通等部门从事土石方填筑工程的技术人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

《水利水电施工》丛书 土石料压实和质量控制

杨 荫 华

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 9.125印张 201千字
1992年11月第一版 1992年11月北京第一次印刷

印数0001—3230册

ISBN 7-120-01631-8/TV·600

定价7.10元

水利科普丛书编审委员会名单

主任委员 史梦熊

副主任委员 董其林

委 员 （以姓氏笔划为序）

丁联臻	王万治	史梦熊	田 园
李文治	邴凤山	杨启声	张宏全
张林祥	沈埊卿	陈祖安	陈春槐
汪景琦	郑连第	郭之章	赵珂经
茆 智	陶芳轩	谈国良	徐曾衍
蒋元驹	曹述互	曹松润	董其林
颜振元			

序

水是人类生存和社会生产必不可少的物质资源。水利工作的基本任务是除水害、兴水利，开发、利用和保护水资源，为工农业生产和人们的物质、文化生活创造必要的条件。普及水利科学技术知识，让更多的人了解和掌握水利科学技术，也是两个文明建设的内容之一。为此，针对水利战线职工和社会上不同文化程度读者的需要，分层次地编写出版水利科普读物是十分必要的。

为了帮助水利科技人员的知识更新，掌握一些现代科技知识，并使水利科技成果更广泛地得到推广应用，尽快地形成生产力；为了使广大农村水利工作人员，掌握一些实用的水利基础知识，并应用于生产实际；为了总结和宣传我国水利建设的伟大成就和悠久历史。介绍水利在四化建设和人民生活等方面的重要作用，激发广大人民群众和青少年热爱祖国江河、关心水利事业，我们组织编写了七套水利科普丛书。包括：《现代科技》丛书、《水利科技成果》丛书、《水利水电施工》丛书、《小水电技术》丛书、《农村水利技术》丛书、《中国水利史》小丛书、《水与人类》丛书。这些科普丛书将由水利电力出版社陆续出版。

编写和审定这些丛书时，力求做到以思想性和科学性为前提，同时注意通俗性、适用性和趣味性。由于我们工作经验不足，书中可能存在某些不妥和错误之处，敬请广大读者给予批评指正。

中国水利学会科普工作委员会

1984年7月

前 言

土石料是人类最早使用的天然建筑材料。其起源可以追溯到远古，原始人穴居野外时代，就用土和岩石遮避风雨。大约距今5000余年前，在中东地区，为了解决干旱，已开始用土、石修筑土石坝。我国用土、石修筑堤防和土石坝的历史也很悠久，据历史记载，安徽芍陂土坝，建于公元前六世纪；河南省泌阳县的马仁陂土坝，建于公元前一世纪，遗留的残坝高16m，1958年将其改建为华山土坝。

土石料用途广泛，又是一种用量最大的天然建筑材料。如直接用土、石填筑的路堤、渠堤、堤防、土石坝等土石方填筑工程，一般工程规模较大，使用土、石数量也很大，一个工程的土石方量常是几百万立方米或几千万立方米以上。以土石坝为例，目前世界上高度100m以上的土石坝已有200余座，最高的土石坝是苏联的罗贡坝，坝高达325m，体积最大的土石坝是巴基斯坦的塔尔贝拉坝，坝的总填方达1.3亿 m^3 。

人们用土、石修筑土石方填筑工程，在实践中很早就认识到填方压实的重要性。据我国《管子·度地》记载，在战国时代，修筑黄河堤防的民工，使用的工具有筑（相当现代的夯）。筑（夯）是专门压实填土的工具，说明当时修筑堤防已经采用压实工艺。国外也有许多古老的资料，记载有关用夯击、兽力和车轮等压实方法。土石料压实起源虽很远，但迟至20世纪30年代才逐步建立了压实理论。由于大规模路堤工程和大型土石坝的发展，人们加深对压实规律的研究和认识。美国加州公路处最早有了研究压实的击实仪，并

于1929年已确定用击实仪确定土的最优含水量和最大干容重。1933年美国加州供水局工程师普洛克特(R. R. Proctor)在《工程新闻记录》杂志上发表了“土的压实基本原理”论文，总结了道路工程特别是洛杉矶市修筑土石坝的经验，全面系统的阐述了土的压实原理，对压实曲线的机理作了解释，提出了标准击实仪及室内试验方法，推动了土石方填筑工程的压实质量控制技术的发展，对土力学及土石坝施工技术的发展做出了贡献。

习惯上将30年代以后，根据土力学原理进行设计、施工时严格控制土石方填筑的压实质量的土石坝，称之为近代方法修建的土石坝；而把30年代以前，主要靠经验修建的土石坝称之为老法修建的土石坝。

随着动力和机械工业的发展，压实机械也相应发展。古老的压实机具，主要是夯、碓等人力压实工具；当一有了蒸气机，很快就产生了蒸气平碾。1866年在英国成功制成第一台蒸气平碾；1907年前美国出现了羊足碾，30年代末重型羊足碾重达20t；振动器、小型气胎碾也是在30年代出现的。二次世界大战后，随着土方机械的发展，压实机械迅速发展，战后有了重型气胎碾、凸块碾、网格碾和各种类型的振动碾。过去碾子多为牵引式，近年来一些轻型碾子采用自行式较多。压实机械的发展也促进了压实技术的发展。1980年在巴黎召开了国际压实技术会议，发表了压实理论、压实技术、质量控制等方面的论文115篇，而且除土石料的压实外，尚包括一些有关沥青和混凝土压实方面的文章。

土石料填筑的压实质量控制，自普洛克特压实基本原理发表后，才逐步标准化、规范化。目前各国规范对压实质量控制的规定主要有三种方式：①质量标准控制方式，只要求

最终达到一定的质量标准，施工者可以采用任何压实机械和压实方法；②施工方法控制方式，只规定施工方法，如压实机械类型规格，压实层厚、遍数等，不要求应达到的压实质量标准；③质量标准和施工方法双重控制方式，既规定施工方法又规定最终必须达到的质量标准。不同国家、不同机构、不同类型的工程采用的质量控制方式不同。压实质量控制指标多用压实度（粘性土）、相对密度（无粘性土）、孔隙率和沉陷量（堆石料）等。道路方面还采用加州载荷比值（CBR值）、平板载荷试验的形变模量等。密度或容重的测定方法有环刀法、灌砂法和灌水法等；含水量的测定多采用快速含水量测定法，70年代逐步推广使用核子湿度密度计测定含水量和密度，80年代出现了压实计；由于一些工程填筑强度很高，近年来，开始研究质量控制试验的全面自动化。

自1953年戴维斯（Davis）首次提出土石方填筑质量控制的统计评价法后，多数土石坝工程均在质量控制中引用了数理统计概念，有些土石坝采用了统计的质量控制方法。

土石方填筑工程是用土、石等天然建筑材料经过开挖、运输、卸料、摊铺、压实等工序修筑而成。其基本要求如下：

- 1）必须有足够的强度，在自重及上部荷重作用下是稳定的；
- 2）在自重和上部荷重作用下，沉降变形较小，不致破坏；
- 3）不发生过大的收缩和膨胀；
- 4）根据工程要求有足够的防渗性能或排水性；
- 5）在工程使用期，其工程性质（强度、防渗性、压缩

性等)比较稳定。

为了满足以上要求,除须根据工程性质选择适宜的土石材料外,填筑后必须很好的压实。因为土、石经过压实后密度增加,可以提高其抗剪强度,减少其渗透性和压缩性,减弱了液化势,增加抗冲刷能力,大大改善了其工程性质。

土石方填筑工程,其压实费用一般仅占总造价的5%~15%,但压实工作直接影响工程质量,是决定工程质量的关键工序。有些工程曾因压实方法或控制含水量不当,压实质量达不到设计标准,被迫临时变更设计或中途停工;有些工程因压实质量差,完工后发生滑坡、裂缝、漏水等质量事故,不能正常发挥工程效益。因此,正确掌握土、石的压实特性,合理选择压实机械和压实施工参数,作好压实质量控制,乃是土石方填筑工程的重要问题之一。

本书第一章土、岩石的物理性质和分类,简要叙述了与土、石分类及判别压实程度有关的物理性质指标和通用的分类方法,比较详细的介绍了土的三相比例图示法。第二章土石料压实,比较全面系统的论述了粘性土的压实原理,无粘性土和石料压实特征,影响压实的主要因素,压实对土石料工程性质的影响,各种压实机械的性能,室内压实试验,现场碾压试验及土石方填筑的压实等。第三章压实质量控制,阐述了判别土、石方填筑的压实质量指标,质量控制试验及统计的质量控制等问题。

本书承蒙中国水利学会施工专业委员会主任、水利水电规划设计总院纪云生教授级高级工程师审阅,提出许多宝贵的意见,特此表示感谢。

限于作者水平,书中不当和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

序

前 言

第一章	土、岩石的物理性质和分类	1
第一节	土的物理性质和分类	1
第二节	岩石的物理性质和分类	36
第三节	土石坝筑坝材料的分类	44
第二章	土石料压实	46
第一节	粘性土的压实	47
第二节	无粘性土和石料的压实	72
第三节	压实对土石料工程性质的影响	83
第四节	压实机械	92
第五节	土石坝填筑含水量和填筑标准	150
第六节	土料含水量的调节	155
第七节	现场压实试验	164
第八节	土石方填筑的压实	174
第三章	压实质量控制	201
第一节	判别压实质量的指标	201
第二节	质量控制试验和质量控制方法	208
第三节	统计的质量控制	241
参考文献		278

第一章 土、岩石的物理性质和分类

岩石是构成地壳的自然物体，由多种矿物或一种矿物组成的集合体。岩石的颗粒胶结较坚固，但经过成岩过程和长期地质历史中的多次地壳运动，岩体被层理、节理、裂隙、断层等各种结构面所切割，所以，天然岩体是既有连续性又具有裂隙性。从天然岩体开采的石料，有的呈完整的块体，有的是被许多裂隙切割的块体。

土是覆盖于地表、没有胶结和弱胶结的堆积物。土是地表岩石在漫长的地质年代经过物理风化、化学风化生成的。这些风化产物或者保留在原地，或者由风、水或冰川搬运形成新的沉积物。土是由矿物颗粒和或大或小的孔隙组合起来的，这些孔隙被水和空气所填充，所以土的显著特征是它的多孔性和散体性。

第一节 土的物理性质和分类

一、概 述

土是由矿物颗粒（固相）、水（液相）和气体（气相）所组成的三相体系。各种土的颗粒大小和矿物成分差别很大，三相间的数量比例也不相同，而且土颗粒与其周围的水又发生着复杂的物理化学作用。所以，要研究土的性质就必须了解土的三相组成以及土的结构和构造等特征。

土的三相决定物质的性质、相对含量以及土的结构、构

造等各种因素，必然在土的轻重、松密、干湿、软硬等一系列物理性质和状态上有不同的反映。土的物理性质又在一定程度上决定了它的力学性质，所以物理性质是土的最基本的工程特性。

本节主要介绍土的组成物质、三相比 例 指 标 以 及 粘 性 土、无粘性土的物理特征。

二、土 的 组 成

(一) 土的固体颗粒

土的固体颗粒(土粒)的大小和形状、矿物成分及其组成情况是决定土的物理力学性质的重要因素。粗大土粒往往是岩石经物理风化作用形成的碎屑，或是岩石中未产生化学变化的矿物颗粒，如石英和长石等；而细小土粒主要是化学风化作用形成的次生矿物和生成过程中混入的有机物质。粗大土粒其形状都呈块状或粒状，而细小土粒其形状主要呈片状。土粒的组合情况就是大大小小土粒含量的相对数量关系。

1. 土的颗粒级配 在自然界中存在的土，都是由大小不同的土粒组成的。土粒的粒径由粗到细逐渐变化时，土的性质相应地发生变化，例如土的性质随着粒径变细可由无粘性变化到有粘性。因而，可以将土中各种不同粒径的土粒，按适当的粒径范围，分为若干粒组，各个粒组随着分界尺寸的不同而呈现出一定质的变化。目前土的粒组划分方法并不完全一致，表1-1是原水利电力部土工试验规程(SD128-84)规定的土粒粒组的划分方法。

土中土粒的大小及其组成情况，通常以土中各个粒组的相对含量(各粒组占土粒总重量的百分数)来表示，称为土

表 1-1

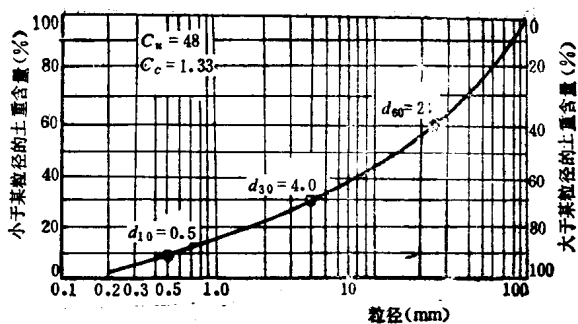
土粒粒组的划分 (SD128-84)

名 称	粒径范围 (mm)	名 称	粒径范围 (mm)
漂石(磨圆的), 块石(棱角的)	>200	砂 粒	2~0.05
大	>800	粗	2~0.5
中	800~400	中	0.5~0.25
小	400~200	细	0.25~0.10
卵石(磨圆的), 碎石(棱角的)	200~20	极 细	0.1~0.05
极 大	200~100	粉 粒	0.05~0.005
大	100~60	粗	0.05~0.01
中	60~40	细	0.01~0.005
小	40~20	粘 粒	<0.005
圆砾, 角砾	20~2	胶 粒	<0.002
粗	20~10		
中	10~5		
细	5~2		

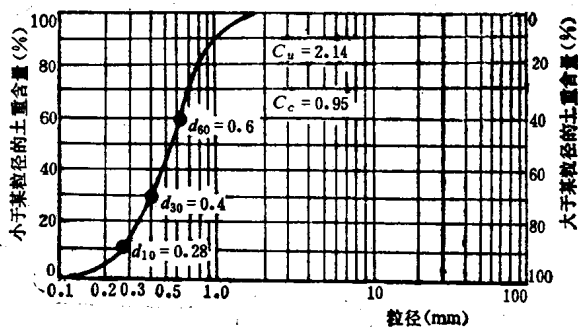
的颗粒级配。

土的颗粒级配是通过土的颗粒分析试验测定的。对于粒径大于0.1mm的粗粒组可用筛分法测定。使用的标准筛分粗筛和细筛,粗筛孔径分100、80、60、40、20、10、5、2mm 8种,细筛孔径分为2、1.0、0.5、0.25、0.1mm 5种。试验时将风干、分散的代表性土样通过一套孔径不同的标准筛,称出留在各个筛子上的土重,即可求得各个粒组的相对含量。粒径小于0.1mm的极细砂、粉粒和粘粒难以筛分,一般可根据土粒在水中匀速下沉时的速度与粒径的理论关系,用比重计法或吸管法测得颗粒级配。

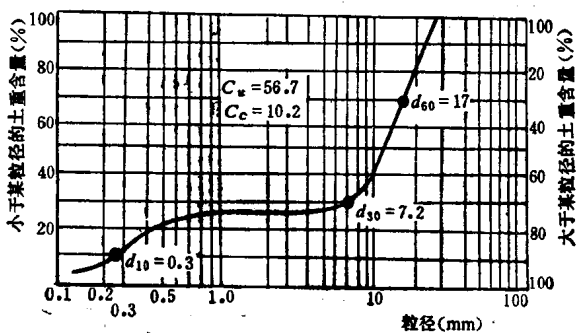
根据颗粒分析试验成果,可以绘制如图1-1所示的颗粒级配曲线。其横坐标表示粒径,采用对数坐标表示,纵坐标表示小于(或大于)某粒径的土重含量。由曲线的坡度可以



(a)



(b)



(c)

图 1-1 土的颗粒级配曲线

(a)良好级配; (b)不良级配; (c)不良级配

大致判断土的均匀程度。如曲线较陡，则表示粒径大小相差不多，土粒较均匀；反之，曲线平缓，则表示粒径大小相差悬殊，土粒不均匀，即级配良好。

小于某粒径的土重含量为60%时，相应的粒径称为控制粒径 d_{60} 。小于某粒径的土重含量为10%时，该粒径称为有效粒径 d_{10} 。当小于某粒径的土重含量为30%时，该粒径用 d_{30} 表示。

用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 两个指标来分别描述颗粒级配曲线的坡度和形状，其定义为：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (1-2)$$

良好级配，指土的粒径范围较宽广，各个粒组都有一定含量，其颗粒级配曲线多呈下凹形。须同时满足以下两个条件： $C_u \geq 5$ ； $C_c = 1 \sim 3$ 。例如图1-1(a)。

不良级配，指土的颗粒均匀或缺乏中间粒径。不能同时满足上述两个条件。例如，图1-1(b)及图1-1(c)代表两个不良级配土的颗粒级配曲线。

2. 土粒的矿物成分 土粒是岩石风化的产物。岩石经物理风化后破碎成碎屑，但其矿物成分并不改变，主要还是构成岩石的那些原生矿物，如石英、长石、云母等。岩石经化学风化后，其原生矿物发生了化学变化而形成次生矿物。次生矿物按其与水作用的关系可分为可溶的与不可溶的两种。可溶者又细分为易溶、中溶和难溶的三种。不可溶的次生矿物都是原生矿物经溶滤过后的次生变质产物，是构成粘土颗粒的主要成分，故又名粘土矿物。

不同矿物成分对土的性质有着不同的影响，其中以细粒组的粘土矿物尤为重要。粘土矿物的颗粒极小，在电子显微镜下观察到的形状一般呈片状，也有的为针状、管状或棒状。经x射线分析证明其内部具有层状晶体构造，基本上是由两种原子层（称为晶片）构成的。一种是硅氧晶片，另一种是铝氢氧晶片。由于晶片组合情况的不同，便形成了具有不同性质的各种粘土矿物。其中主要的有蒙脱石、伊利石和高岭石等。主要粘土矿物的物理特性见表1-2。

表 1-2 主要粘土矿物的物理特性

粘土矿物	形 状	直径(10^{-8} m)	厚度(10^{-8} m)	比表面积(m^2/g)
蒙 特 石	呈薄片状	0.1~1	0.001~0.01	700~800
伊 利 石	片 状	0.1~2	0.01~0.2	65~100
高 岭 石	具有一定的形状，呈六边形片状	0.3~4	0.05~5	10~20

蒙脱石晶片之间间距大，具有非常弱的键联结，亲水性强，易引起大量膨胀和收缩。另外，压缩性高、强度低亦是蒙脱石的显著特点。高岭石晶片之间间距小，具有很强的氢键联结，结合十分牢固，因此，水不能自由渗入，亲水性差、可塑性低、压缩性亦低。伊利石矿物的工程性质则恰好居于二者之间。

（二）土中的水和气

1. 土中的水 土中的液体部分通常是水，它与固体颗粒一样在土的组成结构中占有重要地位。不能将土中的水看成是与固体颗粒机械混合的物质，水有机地参加土的结构，对土的性状起到很大影响。土的性质变化并不完全与土的湿

度变化成正比，而是一种复杂的物理—化学变化。土的性质不仅取决于水的绝对含量，而且取决于水的形态、结构以及介质的物理条件及化学成分。

A.K. 拉里奥诺夫等人利用现代观点对土中的水提出了新的划分方法。划分原则是：①形态；②水分子引力与重力引力的关系；③水与矿物颗粒相联结的形式。见表1-3。

表 1-3 土 中 水 的 分 类

水的形态	水分子引力 P_m 与重力 引力 P_r 之关系	水与矿物颗粒的联结形式
气 态 水		物理—化学联结
液 态 水	结合水 $P_m > P_r$, 强结合水(似固体水) 弱结合水(过渡型水)	物理—化学联结
	毛细管水 $P_m \geq P_r$,	物理—力学与物理—化学混合联结
	重力水 $P_r > P_m$	物理—力学联结
固 态 水	结晶水和化学结合水, 冰	

从理论研究角度来说，对各种水均有研究的必要。但对研究土的工程性质而言，气态水应属气体部分，固态水的冰及结晶水应属固体部分。因此一般在土力学中，土中水均指液态水，按上表划分为强结合水、弱结合水、毛细管水和重力水四种类型。

(1) 强结合水。强结合水是指紧靠土的固体颗粒表面，厚度仅2~3个分子层的水。水分子由于静电引力和氢键联结力的作用，牢固的吸附于颗粒表面。因此它具有高粘度和抗剪强度，没有溶解能力，不能传递静水压力，只有吸热变成蒸汽时，才能移动。